WITH THE AUTHOR'S COMPLIMENTS

Kou KUSUNOKI 1955 Recent Advances in the Study of Sea Ice. *Low Temperature Science, Ser. A, 14.*

綜　説

海氷研究の最近の發展*

楠　宏
（低温科学研究所　海洋学部門）

（昭和30年9月 受理）

I. 緒　言

海氷は多くの極地航海者や極地探検家などによつて昔から注目されている。今世紀に入つてから海氷に関係のある各国において観測を開始し，海氷自体の物理・化学・生物学的な諸性質も研究されるようになつた。

海の上で見られる氷を海氷というのであるが，海水が凍結して直接生じたせまい意味の海氷と，陸上で生じた氷(たとえば氷河の氷)でが海中に浮んだもの，河川や湖沼の氷が海中に流れこんだものも海氷といつている。この報告では主に海水の凍結によつて生じた海氷を取扱うことにする。わが日本近海——オホツク海，日本海北部，太平洋北西部——の海氷はほとんど海水の凍結したものであり，河川や湖沼から流出したものはきわめて少ない。また氷河や万年氷はこの地方に存在しないので，陸氷が海上に漂いでることはない。

海氷の地理的分布は Zukriegel (1935)[1] によれば全海洋の面積 (361×10^6 km^2) の約 23% にわたつているといわれる。このように海洋の広い面積で活動する海氷は航海，漁業等の実生活の面で直接われわれに影響をあたえている。また海洋自身の process において，海氷は非平衡の状態にあるわけで，海氷の生成および融解によつて海況は大きく左右される。さらに海洋と大気との相互作用において海氷のはたす役割は無視できない。地質学的な問題としての氷期や気候変化にたいしても海氷は関係をもつている。“天気は極地によつて支配される”とよくいわれるが，気象のみならず地球上の多くの天然現象は極地——雪と氷の世界-——の状況と密接な関係があり，1882–83 年の第1回国際極地年 (International Polar Year) において極地の氷の観測が大きな意味をもつていたのは当然であろう。さらに来るべき国際地球観測年 (International Geophysical Year 1957–58) においても極地方の氷の観測が提察されている (Chapmann, 1955)[2]。

海氷は自然界にみられる“氷”の一種であり水 (H_2O) 自身の性質が複雑であるから海氷自身の物性も不明の点が多い。したがつて浅学の筆者がそのすべてについて最近の動向を言及す

---

* 北海道大学低温科学研究所業績　第288号

POLAR PAM 2095
POLARPAM
54643
Pam:551.326.7 KUS

ることは非常に困難なことであり，そのために多くの偏見や誤謬があるものと思われるが，あえて最近数年間の発展をのべることにする。

従来海氷の観測や研究が盛んであつたのは，多くの極地探検や航海という実用上から必然的に研究を要請される北半球の諸国であつた。南半球の諸国はまずほとんど問題がなかつたようである。とくに北欧諸国やソヴエトでは海氷観測が古くから続けられている。近年——とくに戦後——になつて北極地方えの諸国の関心が高まつてきた。また北極圏を通過する航空路も発達し，とくに北米において海氷えの関心が高まつたことに注目したい。ソヴエトにおいては，1920年ころから北極地方の研究が盛んになり，北氷洋航路の完遂と極地方の資源開発とを目的とした北氷洋の研究は活潑である。しかし1940年ころからの状況が，その出版物がほとんどわが国に入つていないのでよくわからないのは残念である。本稿においては最近数年間の進歩についてのべることにしてあるが，ソヴエトについては多少古い時代のものべておく。これは，従来ソヴエトの事情はわが国にはあまりよく判つていないように思われるからである。また，従来ソヴエトの文献は，原文について正しく引用されていることが少ないように考えられるので，なるべくロシヤ文字をローマ字のアルファベツトに転字してしめすことにした。転字の方法には種々あるが，ここではイギリス流*にしたがつた。

本文はまず海氷の観測，とくにルーチン観測に類するものの状況をのべ，つぎに海氷の基礎的な性質の研究や観測について言及したい。現在海氷の研究は，どこの国においても航海などの実生活に直接結びついた海氷予報が大きな目的となつているようである。この点から沿岸の観測所や航空機による氷状観測がおこなわれている。そして大気現象との関係が種々論じられているようである。海氷の物性に関する研究はきわめて数が少ないように思われるので本稿ではあまり詳細にふれないでおき，次の機会をえて論じたい。

II. 海氷状況の綜観的研究

海氷の研究が過去においては多くは海氷状況の記載的研究がなされ，海氷自身の物理的・化学的性質などの研究に発展してきた。海氷は気象や海況と密接な関係があるため，世界各国では気象や水路業務に関係のある官署が中心となつて海氷の観測をやつている。わが国においても1892年(明治25年)に北海道沿岸の気象官署や燈台によつて観測が開始され現在に及んでいる。わが国では行われていないが，各国では航空機による観測が非常に盛んなことが現在のわれわれに注目されるところである。しかし，古くからの沿岸観測所，船舶は今日でも氷状を知るためにもつとも大きな役割をはたしている。これら種々の方法によつて海氷状況がわかり，

---

* Permanent Committee on Geographical Names for British Official Use (P.C.G.N.) が1948年に決定した方式。

それと気象，海洋の状況とを関係付けて綜観的な研究が種々なされている。しかし筆者はこのような研究には直接従事していないので詳細にわたつて述べることはむずかしい。その概略を，観測業務を行なつている機関，測観方法，海氷の分類と術語，報告の形式等についてのべることにする。

1. 海氷観測機關

すでにのべたような気象，水路官署が各国の中心となつて観測をしている。ここでいう海氷観測機関とは通常ルーチン観測をおこなつている所をいう。それらの主なものを列挙する。

イギリス
Meteorological Office; Hydrographic Department.

デンマーク
Meteorologisk Institut.

ドイツ
Deutsches Hydrographisches Institut.

スゥエーデン
Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.

フインランド
Havsforskningsinstitutet (Institute of Marine Research).

ソヴエト
Glavnoye Upravleniye Severnogo Morskogo Puti (略称 Glavsevmorputi, GUSMP, 北氷洋航路総局).
Glavnoye Upravleniye Gidrometeorologicheskoy Sluzhby (略称 GUGMS, 水理気象業務総局).

カナダ
Meteorological Division, Department of Transport; Geographical Branch, Dept. of Mines and Technical Surveys, Hydrographic Service.

アメリカ
Hydrographic Office; Weather Bureau; Coast Guard.

南半球の諸国においても，上記のものに似た官署が海氷に興味をもつているものと思われる。しかし定常的な観測はなされていないようである。

わが国においては気象台――中央気象台，函館海洋気象台，札幌管区気象台のもとにある北海道沿岸の測候所，海上保安庁――水路部，燈台部，および船舶による観測がなされている。

以上の諸機関においてなされた観測，または収集された資料は種々の形式で報告されているが，歴史的に古いものはデンマーク気象台の“北極海域の氷狀”[3]であろう。これは1901年から毎年1冊づつ（ただし1940–45年の分は未刊）刊行されている。これには1899年にベルリンで第7回国際地理学会が開かれ，デンマーク気象台は北極に関する資料の保管にあたるとい

う決議があり，これと関連して氷状の報告も刊行が続けられてきたのである。またソヴエトでは“ソヴエト海域の氷況”と題する報告が1926–1936年に出版された。その後“氷年報”(Ledovyye Yezhegodniki)や“氷予報報告”(Vypuski po ledovym prognozam)が北氷洋航路総局から刊行されたが，1945年以降の状況は不明である (Armstrong, 1950)[4]*。このほか北欧の各国で氷状報告を出しているようであるが，実物に接していないのでこれ以上ふれない。これらの報告は各海域の各地の流結氷初終日，航海停止期，氷厚等のデータが主である。

アメリカにおいては，海氷の観測ではないが氷山の観測がある。1912年に有名な“Titanic号”の氷山衝突事件があり，これを契機として北大西洋航路の安全のため関係各国共同で氷山の観測監視にあたることになつた。この機関をInternational Ice Observation and Ice Patrol Serviceといい，米国のCoast Guardがその実施の中心となつている。現在までその報告がU.S. Coast Guard Bulletinに発表されている。ふつうの海氷については北アメリカではごく最近になつて観測が始まつたので報告もまだすくない。

以上の観測は，最近の傾向は飛行機の使用が盛んになつていることである。ソヴエトでは1929年から，バルチック海では1920年ころから試みられ，1929年頃から定期的に用いられている。アメリカでもIce Patrol Serviceに1946年から常時使用されている。わが国においても今次大戦前から戦中にかけて軍や中央気象台で使用した。戦後はまだ用いられていない。今後氷状観測に飛行機の使用度はますます高まつて行くものと思われる。

それでは，このような観測にあたつてどのような方法が採用されているかをつぎにのべる。わが国においては勿論であるが，諸外国でも沿岸観測は今日でもその主力であると思われる沿岸観測を中心に稿をすすめる。

2. 観測方法

海氷観測の方法を別すると沿岸観測，船舶観測，飛行機観測，氷上を横断渡渉しての観測，物性に関する観測などになるであろう。船舶による観測はソヴエトの如く観測のみに用いる船をもつている国以外は，多くは商船などに通報を委託しているところが通例である。近年の飛行機観測はかなりの速度で発展しつつあり，その利点については改めて申すまでもないであろう。海氷の物理・化学・生物等の基礎的性質に関する観測は，前述のルーチン観測に比べて非常に数が少ない。これについては別項でのべることにする。

わが国において日本海洋学会（主として気象台の方々）が“海洋観測指針”(1955)[5]を編纂されたが，そのなかに“海氷観測”の1項が加えられている。これは今後のわが国の観測の統一にいう点で大きな進歩である。“海氷観測”にはその基本となる海氷の術語については主に“国際分類と命名”(International Ice Nomenclature)[6]を採用している。この分類は1952年にロンドンでWMO (World Meteorological Organization)の海洋気象分科会が決定したものである。

---

* “雪氷”, 15巻6号に拙訳をのせた。

国際分類については次節で紹介することにする。さて“海氷観測”はおもに陸上の観測所から氷狀図，氷量，氷の狀態，運動などを観測する方法をのべている。さらに野帳の記入方法，プランクトンや塩分の測定法にもふれている。

筆者の知る限りでは海氷観測法に関する成書，方法を論じた報告などはソヴエトに多いように思われる。古いものも含め，Gakkel' (1944)7)，Glagoleva and Istoshin (1951)8)，Karelin and Petrichenko (1942)9)，Karelin *et al* (1946)10)，Petrichenko (1944)11)，Smesov (1951)12)，などの報告がある。また Glavsevmorputi (194413)，195314)) および GUGMS (194015)，1946–4916)，195117)) の発行する観測指針がある。これらの詳細は不明であるけれども，さいきん出版された Deryugin and Karelin (1954)18)* の著書“海氷観測法”によつていくぶん推察することができる。本書については内容を充分読みおえていないが，海氷観測の歴史から始まり，沿岸，船舶，飛行機，特殊観測，観測組織と分化等についてのべている。参考になる点が非常に多いので別の機会に詳しい紹介をする予定である。

ヨーロッパの北欧諸国間には1936年のヘルシンキ，1938年のベルリン，リユーベックで開かれた会議で決定した“バルチック海氷符号” (Baltischer Eisschlüssel) というのがある。その後1952年の国際分類を参考にし，バルチック海の特色を生かして1954年9月1～3日，ヘルシンキで開かれた会議で“東海氷符号” (Ostseeschlüssel) がきめられた。これに参加したのは次の国々の海氷観測実施機関である：デンマーク，ドイツ，フインランド，ノルウエー，スウエーデン。これは1954/55年の冬から実施されている (Nusser, 1954)19)。この符号は至つて簡単なもので，海氷の観測方法と直接の関係はなく，報告の一形式である。符号は氷狀 (Eisverhältnisse) と氷狀変化 (Entwicklung der Eislage) とに大別され，それぞれ0, 1, 2,……9, X の11階級にわかれている。これは無電通報や統計の便利のためである。

アメリカでは戦中にかけて海氷，特に北極地方への関心が深くなり，“北半球の氷地図” (1946)20)，“氷の術語集” (1952)21) が米国水路部によつて発行されている。海氷観測法や報告形式などについての詳細は知りえないが，前述の Deryugin and Karelin の書物のようなものは発行されていないようである。ただ，氷中航海の指針書 (1950)22) がだされている。

つぎに，海氷観測の基礎となる海氷やそれに関連した現象の術語についてのべておく。

3. 海氷の分類と術語

海氷の分類や術語については多くの報告がなされている。たとえば Zukriegel, Maurstad (1935)23)，Gakkel' and Laktionov (1940)24) などは夫々写真を附してのべている。近年のものには前述の WMO による氷の国際分類と米国水路部の術語集，さらにソヴエトで1953年3月にきめられたものに注目したい。

---

* “雪氷”に筆者がかんたんに紹介した。

第1表 国際海氷命名 (International Ice Nomenclature (WMO), 1952).

1. 海氷 (Sea Ice)

1.1 発達と消滅 (Development and Decay)
  1.11 新氷 (New Ice)
    1.111 氷晶 (Ice crystal/Frazil crystals)
    1.112 膜氷 (Slush/Sludge)
    1.113 蓮葉氷 (Pancake ice)
    1.114 氷殻 (Ice-rind)
  1.12 板状軟氷 (Young ice)
  1.13 一冬氷 (Winter ice)
  1.14 多年性岸氷 (Old Bay-ice)
  1.15 棚氷 (Shelf-ice/Barrier-ice)
  1.16 極氷 (Polar ice)
  1.17 融解氷 (Rotten ice)
  1.18 砕氷 (Brash-ice)
1.2 不動氷の形態
  1.21 不動氷 (Fast ice)
    1.211 一年性不動氷 (Winter fast-ice)
    1.212 極地不動氷 (Polar fast-ice)
  1.22 氷脚 (Icefoot)
  1.23 坐氷 (Anchor ice/Ground ice)
1.3 流氷 (Pack-Ice/Drift-Ice)
  1.31 氷量 (Closeness)
    1.311 最密流氷 (Very close pack-ice/Very close drift-ice)
    1.312 密流氷 (Close pack ice/Close drift-ice)
    1.313 疎流氷 (Open pack ice/Open drift-ice)
    1.314 稀流氷 (Very open pack-ice/Very open drift-ice)
  1.32 大きさ (Size of Floes)
    1.321 氷塊 (Ice-floe/Floe)
    1.322 氷片 (Ice-cake)
    1.323 大氷岩 (Bergy-bit (Floeberg)*)
    1.324 氷岩 (Growler)
    1.325 砕氷 (Brash-ice)
  1.33 氷の配置 (Arrangement)
    1.331 氷限 (Ice limit)
    1.332 氷縁 (Ice-edge)
    1.333 氷堤 (Ice-bar)
    1.334 氷湾 (Bay/Bight)
    1.335 氷舌 (Tongue)
    1.336 氷野 (Ice-field)
    1.337 氷原 (Patch)
    1.338 流氷帯 (Belt)
    1.339 小流氷帯 (Stream/Strip/String)
  1.34 表面の状態
    1.341 平坦氷 (Level ice)
    1.342 凹凸氷 (Pressure ice/Screw ice)
      1.3421 筏氷 (Rafted ice)
      1.3422 氷丘氷 (Hummocked ice)
      1.3423 氷丘脈 (Pressure ridge)
    1.343 風化氷 (Weathered ice)
    1.344 氷池 (Melt-water pool)
    1.345 水中氷底 (Submerged icefoot)
  1.35 氷中の無氷域
    1.351 割目 (Crack)
      1.3511 潮汐割目 (Tide-crack)
    1.352 水路 (Lead/Lane)
      1.3521 沿岸水路 (Shore lead)
    1.353 氷湖 (Pool)
    1.354 開水面 (Open water)
  1.36 大気現象
    1.361 水空 (Water-sky)
    1.362 氷映 (Ice blink)
    1.363 氷煙 (Frost smoke)

2. 陸に起因し海上でみられる氷

2.1 万年雪 (Firn-snow/Névé)
2.2 氷河氷 (Glacier ice)
  2.21 氷河舌端 (Glacier tongue)
2.3 棚氷 (Shelf-ice/Barrier-ice)
2.4 氷山 (Iceberg)
  2.41 氷河氷山 (Glacier berg)
  2.42 卓状氷山 (Tabuler berg/Barrier berg)
2.5 大氷岩 (Bergy-bit)
2.6 氷岩 (Growler)
2.7 砕氷 (Brash-ice)

(*：海氷に起因することが明白なときには, Floeberg を用いる)

1952年のWMOによる分類は海でみられる氷には海，陸地，河川湖沼の3つの起源があるが，前2者の氷のみを命名し，河川湖沼氷は海氷に順ずることにしてある。この分類を第1表にしめしておく。

第1表の邦訳は筆者がつけたもので，不適当なものも多いと思われるので原文によつて推察して頂きたい。WMO原報告には第1表の分類のあとに約70ばかりの術語が定義されている。板状軟氷の氷厚 (5～15 cm) などについては多少の異論があるが，これらの点については今後改正されるであろう。

米国水路部の氷の術語集は第2表のような大分類があり，本文に約400の術語が定義されている，巻末には110枚の写真が附されている。

第2表　米国水路部の氷の分類
(A Functional Glossary of Ice Terminology, 1952 より)

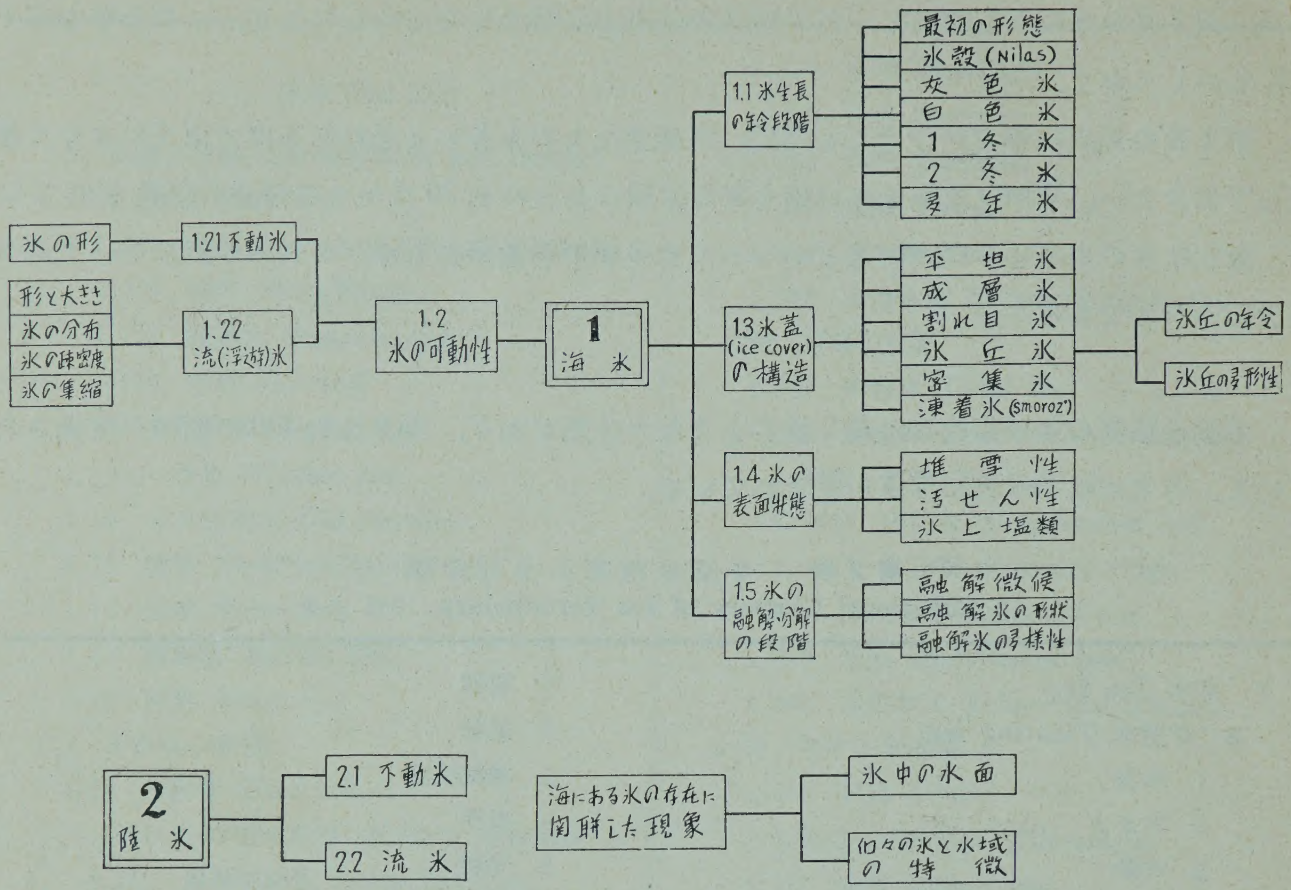
- Ⅰ．海氷 (Sea Ice)
  - A．浮遊氷 (Floating Ice)
    - 1. 氷量
    - 2. 大きさ
    - 3. 年齢
    - 4. 表面状況
  - B．不動氷 (Fast Ice)
    - 1. 型
    - 2. 海岸へ碇着の状態
    - 3. 大きさ
- Ⅱ．陸氷 (Land Ice)
  - A．型 (Type)
    - 1. 起源
    - 2. 運動
    - 3. 堆積状況
    - 4. 境界
    - 5. 分解
  - B．関係事項
- Ⅲ．湖氷 (Lake Ice)
- Ⅳ．河川氷 (River Ice)
- Ⅴ．特殊項目 (Special Terms)
  - A．航海
  - B．天候
  - C．その他

第2表の大分類の各項目は必要に応じてさらに小区分されている。たとえば I. A. 1 は a. 開水面 (Open water), b. 散在氷 (Scattered Ice)……，と細分されている。

ソヴエトでは1920年ころから水路部が中心となつて海氷の術語が制定され，そののち前述の Gakkel' and Laktionov (1940) のものがあり，1953年3月に関係官庁の連合委員会が分類の改正をおこなつた。これを第3表にしめす。

第3表の様式をみてすぐ気付くことは，第1表の国際分類と同様の数字の指数をつけてあることである。第3表はさらに個々の氷に分類されている。その1例として1.111 氷晶 (Ledyanyye igly), 1.112 膜氷 (Ledyanoye salo), 1.211 不動氷の形態, 1.2111 岸氷 (Pripai), 1.21111 氷上水帯 (Ledyanoy zabereg), があげられる。しかしその原報告25)をみていないので個々の術語の定義については不明である。

第3表　海氷分類模式図（ソヴェト，1953年）



以上の代表的な海氷の分類はおもに氷狀に関係したものであつて，分類の観点を変えて地球化学，機械的性質，岩石学等の分類が考えられる。その1例として Golovkov (1951)26)* は自然氷を岩石学で用いられる分類（その発生起源——岩漿，変成岩，堆積）を応用している。さらに実用上大切な氷の運動——風や海潮流による漂流——に関連した分類や術語の決定も大切である。これらの諸分類について Deryugin と Karelin18) が多少ふれている。

さいきん，イギリスの Scott Polar Research Institute では雪と氷の術語を集録しており，写真帳を作成する予定である。

さて，以上のような海氷の術語によつて実際の観測に際しては氷狀見取図を作成したり，種々の測定をおこなわねばならない。このとき氷狀報告や氷狀見取図などに使用する符号，記号，報告形式などについて以下にのべる。

4.　氷狀記號と報告形式

氷狀を表示するための記号，符号，さらに通報形式，報告書の作成方式などについて簡単にふれておく。特に筆者の興味のあるのは，沿岸において氷狀図を作成する際に氷晶，膜氷，水路，坐氷等の諸形態をどのような記号や符号で表示するかということである。通報（無電など）による形式などは現業に直接関係していないので，筆者がその可否得失を論ずることは適

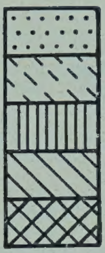
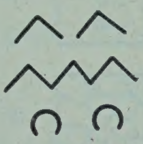
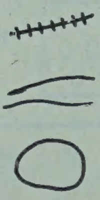
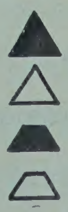
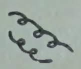
---

*　“雪氷” 16巻6号 (1955) に拙訳あり。

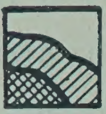
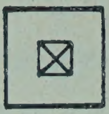
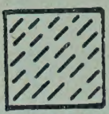
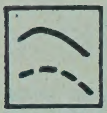
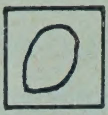
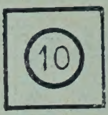
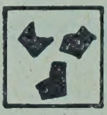
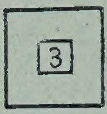
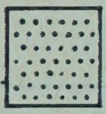
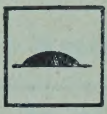
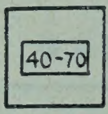
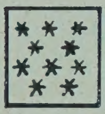
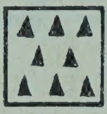
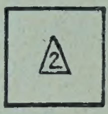
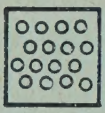
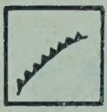
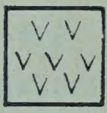
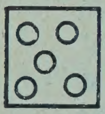
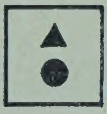
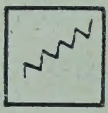
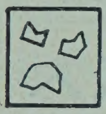
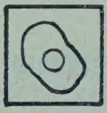
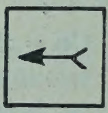
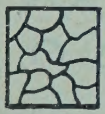
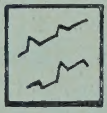
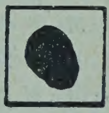
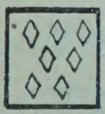
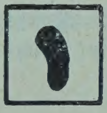
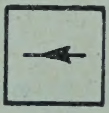
当でないと考えられる。そこで，ここでは戦後開始されたアメリカの様子とソヴエトのものとをしめすことにする。

戦後から 1949 年ころまでのアメリカの，特に海軍を中心とする海氷研究の状況は Bates and Lill (1950)27) によつて報告され，そのなかに飛行機観測による氷状見取図に用いる符号がのべてある。また 1947–53 年の海氷予報の発達を中心とした Bates *et al* (1954)28) の報告にも符号や報告形式がのべてある。これから適当と思われるものを第 4 表にしめしておいた。これは米国海軍水路部が使用しているものである。さらに米国気象局では気象偵察機の氷観測通報形式を暫定的にきめている。これは WMO によつて将来制定されるためである。沢田 (1955)29) が気象局の通報形式についてのべている。

第 4 表　米国水路部の氷状記号　(Bates *et al*, 1954 による)

氷　量 (Concentration)	< 1/10 1/10～5/10 5/10～8/10 8/10～10/10 10/10 (海面なし)	
大きさ別の氷量 (Concentration by Size)	$\frac{Cn}{n_1\, n_2\, n_3}$ ただし： Cn = 氷状 (氷量) $n_1+n_2+n_3$ = 全氷量 n_1 = 膜氷，砕氷量 n_2 = 小，中氷盤 n_3 = 大氷盤，氷原 (いづれも 10 分率であらわす)	
氷　池 (Puddles)	$\frac{Pd}{\text{n または F}}$ ただし： Pd = 氷池 n = 結氷面積 (10 分率) F = 結氷しきつている	
氷　厚 (Thickness)	$\frac{T}{n}$ n = 氷厚 (ft)	
色 (Color)	$\frac{Cl}{\text{We, Bk, Be, Gy, Gn}}$ Cl = 色，　Be = 青 We = 白，　Gy = 灰色 Bk = 黒，　Gn = 緑	
積　雪 (Snow Cover)	$\frac{Sn}{\text{D または O}}$ Sn = 積雪 D = ふき溜り O = 積雪なし	
年　齢 (Age)	$\frac{A}{\text{主, 副}}$ 膜　氷 = Sl 板状軟氷 = Y 一冬氷 = W 多年性極氷 = Pl	
表面状況 (Topography)	筏　氷 (Rafted) 氷丘氷 (Ridged) 氷　丘 (Hummocks)	
海水域の状態 (Water Features)	割　目 (Crack) 水　路 (Lead) 氷　湖 (Polynya)	
陸　氷 (Ice of Land Origin)	氷　山 (多) 氷　山 (少) 大氷岩 (多) 大氷岩 (少)	
視界不良域 (Undercast)		
氷の境界 (推定)		— — —

第5表　ソヴエトの氷状記号
(V.S. Nazarov & A.M. Muromtsev : *Okeanografiya* 1954 による)

	岸氷 (Pripai) と 沿岸		よごれた氷 (Zagryaznennyy led)		推定される氷
	種々の氷量の氷の境界 同じく推定線		円形の氷原		氷　量
	水　域		叢氷 (Pak)		破碎度 (Razrushennost')
	軟氷，膜氷，粥氷		坐氷 (Stamukha)		氷厚 (cm)
	氷殻，蓮葉氷 板状軟氷		氷丘 (Toros)		氷丘度 (Torosistost')
	小砕氷		氷丘脈		氷穴 (Protalina) 氷隙 (Promoina) (青色)
	大砕氷		氷山 (赤色) 氷岩 (赤色)		船の漂流経路
	氷　原		氷池 (Snezhnitsy) (○印は青色)		氷の漂流方向 (赤色)
	凍着した氷原		割目 (青色)		霧 (黄色)
	氷野片		氷中水面 (Razvod'ya) (青色)		船またわ飛行機の 航路 (赤色)

註：氷量の差を色で表現するときにつぎのようにする。
氷量 9–10 褐色，　7–8 淡褐色，　4–6 綠色，　1–3 淡綠色，　水域 青色.

ソヴエトで現在用いられている氷狀に関する記号を第5表にしめした。これは Gakkel' and Laktionov (1940) の“氷のアルバム”にでている符号が改良されたものである。これらの表示方法はわが国の観測にも参考になる点が多いと思われる。またバルチック海域で用いられているものはあまり参考にならないようであるから除いておく。

5.　海氷狀況に關する研究

いままで述べてきたような観測によつて，世界の各海域の毎冬の synoptic な海氷狀況が報

告されている。単に海氷状況それ自体のみならず，気象や海洋との関係が密接であるため，これらまで含めた報告はかなりの数にのぼる。それらを正当に評価することはなかなか困難であるし，筆者の目にふれていないものも多いことと思われる。しかし以下にそれらの概略をのべることにする。

i) バルチツク海

バルチツク海に面する諸国のなかで，海氷状況に関する研究はドイツ，スゥエーデン，フィンランドでおこなわれている。ドイツでは前述の Deutsches Hydrographisches Institut (DHI), Hamburg が観測の中心となつている。そこの Nusser (1948)[30] は 1903/04 年の冬以降の気温（とくに 0°C 以下の積算温度）と氷況を統計的に調べ 1947/48 年の冬はノルマルであつたことをのべている。また 1948/49 年[31]，1949/50 年[32]，1951/52 年[33] の状況ものべている。これらの報告では Büdel (1946)[34] の Eissumme（氷日数の和）と Kältewert（一定温度以下の積算温度）という量が Nusser の氷状解析の中心となつている。またプラスの気温の積算と解氷との関係は統計的に Prahm (1951)[35] によつて論ぜられた。Nusser (1950)[36] は結氷予報の問題と関連して，結氷前どの位の時間の平均気温（マイナス）を用うべきかを考え，之を氷結時間 (Eisvorbereitungszeit) と名付け 28 年間の観測値からドイツ沿岸の氷結時間を求めた。一般に水深の浅い北海沿岸で短かく，バルチック海岸で長いこと見出している。

スゥエーデンにおいては Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Stockholm が研究の中心である。ここでは Icebreaking Service と共同で海氷予報の問題を取扱つている。しかし最近はあまり活潑でない。フィンランドの氷状については Jurva (1937)[37] の仕事が今日の多くの氷状研究の基礎になつている。Jurva はバルチック海氷（毎冬の海氷面積は 60～420×10^3 km^2＝バルチック海全面積）を沿岸から発達する不動氷の消長を地図に示した。この地図を長年月にわたつて統計的に解析し，“Normal winter” という抽象的な氷状を導きだした。さらに，Normal winter に基ずいて各年の氷況を分析した。これを Jurva の Cartographical method という (Jurva, 1941[38], 1950[39])。Palosuo (1953)[40] は近年でとくに氷の多かつた 1941/42 年の冬を詳細に論じた。まずバルチック海で用いられる氷の術語，海氷観測の歴史から始まり Jurva の方法による 1942 年の冬の解析をおこなつた。同様の報告が 1945/46 年—1949/50 年の冬季について Simojoki (1952)[41] によつてなされた。また彼は 1934–53 年のフィンランド沿岸の流結氷初終日，結氷期間などの統計をしめした (Simojoki, 1953)[42]。これらと関連して，Jurva (1952)[43] がバルチック海の海氷面積の 120 年間 (1830–1951) の変動について調べている。また 1720–1829 年の昔についてもおこなつた (Jurva, 1953)[44]。これらから，1900 年以前は全般的に氷が多かつたらしく，1870，1880，1940 年代が特に氷が多い。最近では 1904–14 年，1930–39 年が氷の少ない年になつている。さらに Overlapping mean をとつて 5，10，15～17，20 年等の週期を見出している。

ii) 北氷洋

北氷洋の海氷状況については, Glavsevmorputi 傘下にある北極研究所 (Arkticheskiy Naucho-Issledovatel'skiy Institut) がその中心となつて研究を進めている。これらの研究についてはは1920–45年のあいだの様子は Armstrong[4] の報告で知ることができる。ソヴエトの海洋学者の多くは海氷の研究をしている。これらの海洋研究者の氏名はわが国には比較的知られていないと思われるのでつぎに列挙しておく。

Berezkin, Vs. A. (1899–1946)　*Dinamika Morya* (海洋力学) の著者。理論, グリーンラリド海の観測, 潮汐。
Berg, L. S. (1876–1950)　生物地理, 海洋生物。著者多し。
Burke, A. K. (1891–1944)　船長であるが, "海氷" の著者。
Vize. V. Yu. (1886–1954)　海氷予報, 北極地方の地理学。Wiese とも綴られる。
Davydov, B. V. (1884–1925)　極東海域の観測。
Dobrovol'skiy, A. D.　太平洋北部の海況。
Deryugin, K. M. (1878–1938)　白海, 極東海域の海況, 海洋生物。
Demin, L. A. (1897–　)　極東海域の観測。*Morskoy Atlas* (海況図) の編集者。
Evgenov, N. I. (1888–　)　極東海域の観測。
Efremov, A. G. (1908–1941)　海氷域の航海。
Zubov, N. N. (1885–　)　海氷研究に多くの著作あり。
Karelin, D. B. (1913–1953)　北氷洋の気象, 海氷観測と予報。
Knipovich, N. M. (1862–1939)　海洋学者。特に生物。
Leonov, A. K.　日本海の海況。
Maksimov, G. S. (1876–　)　海洋学, 海洋工学, 極地経験多し。
Matusevich, N. N. (1879–1950)　白海, バレンツ, カラ海の観測。
Mesyatsev, I. I. (1885–1940)　海洋生物学。
Nikitin, M. V.　海洋物理学 (理論)。
Preobrazhenskiy, Yu. V.　バレンツ海の海況。
Ratmanov, G. E.　チユクチ海, バレンツ海の海況。
Somov, M. M.　北氷洋の海洋学。特に海氷。
Sukhotskiy, V. I.　北氷洋の観測。
Timonov, V. V.　海洋物理学 (理論)。
Shirshov, P. P. (1905–1953)　海洋生物学。プランクトンと海氷。
Shmidt, O. Yu. (1819–　)　海氷や北氷洋研究の先駆者。Schmit とも綴る。
Shtokman, V. B.　海洋物理学。海流論。水温。
Shuleykin, V. V. (1895–　)　海洋物理学。*Fizika Morya* (海洋物理学) の著書あり。

さらに海氷研究者としてはつぎのような名があげられる:

Gakkel', Ya. Ya., Laktionov, A. F., Lebedev, V. V., Mamayev, I. M., Petrichenko, A. N., Storozhev, N. M., Vitman, F. F., Volkov, N. A., Tsurikov, V. L.

ここでドイツの海洋研究所 (DHI) で1950年に Büdel が中心となつて作成した北氷洋, 北大西洋, アメリカ東北部, 南氷洋等の氷状図があることを附言しておく (1950)[45]。またすでにのべたデンマーク気象台の "北極海域の氷状" にも再度注目したい。

北氷洋の北アメリカ側の状況については次節においてのべることにする。

iii) アメリカ北方海域

大西洋北西部の Newfoundland 近海では前述の International Ice Patrol が古くから氷山観測をおこなつている。古くは E. H. Smith が最近では F. M. Soule が中心となつている。

1948 年にカナダの Dept. of Mines and Technical Surveys の Geographical Branch46) が中心となつてカナダ北方海域 (Beaufort Sea, Hudson 湾, Baffin 湾, Devis 海峡, Labrador 沿海) の氷状調査を開始した。これについて Frazer (1952)47) が簡単にのべている。またアメリカでは 1947 年ころから水路部が中心となつて，気象局，空軍さらにカナダの気象局，空軍なども加わつて氷状観測がなされてきた。Hare and Montgomery (1949)48) はカナダ北極地方とグリーンランドの気温，水温の分布および海氷状況 (1947–49 年の飛行機観測も含まれている) についてのべている。M. J. Dunbar (1951)49) はこれらカナダ東北部の海況についてくわしい報告をしていて，この海域の海流図を描いている。Moira Dunbar (1954)50) は 1946 年からの飛行機観測の資料に基ずいて，カナダ北極の氷状 (夏と冬の模式図により) を論じている。アメリカ水路部ではバッフィン湾とデーヴイス海峡の各月の氷状図を作成した (U. S. Hydrographic Office, 1954)51)。

グリーンランド東部，アイスランド近海，グリーンランド南部の氷状について Koch (1945)52) が詳細な報告をしている。これはこの地域の氷の種類，最近の氷の観測から記述を進め，氷状の経年変化について特にくわしい。そして氷の多い年，少ない年，変動の週期などを示した。さらに Newfoundland 近海やグリーンランド東部の氷山にもふれている。Schell (1952)53) は氷山の出現とラブラドル海流の一部の起因となる風系との関係を論じた。さらに Newfoundland, Bermuda, Uppsala の気温も考慮して，ニューファウンドランド沖合に現われる氷山とこれら気象要素との相関をしらべ予報に役立たせている。

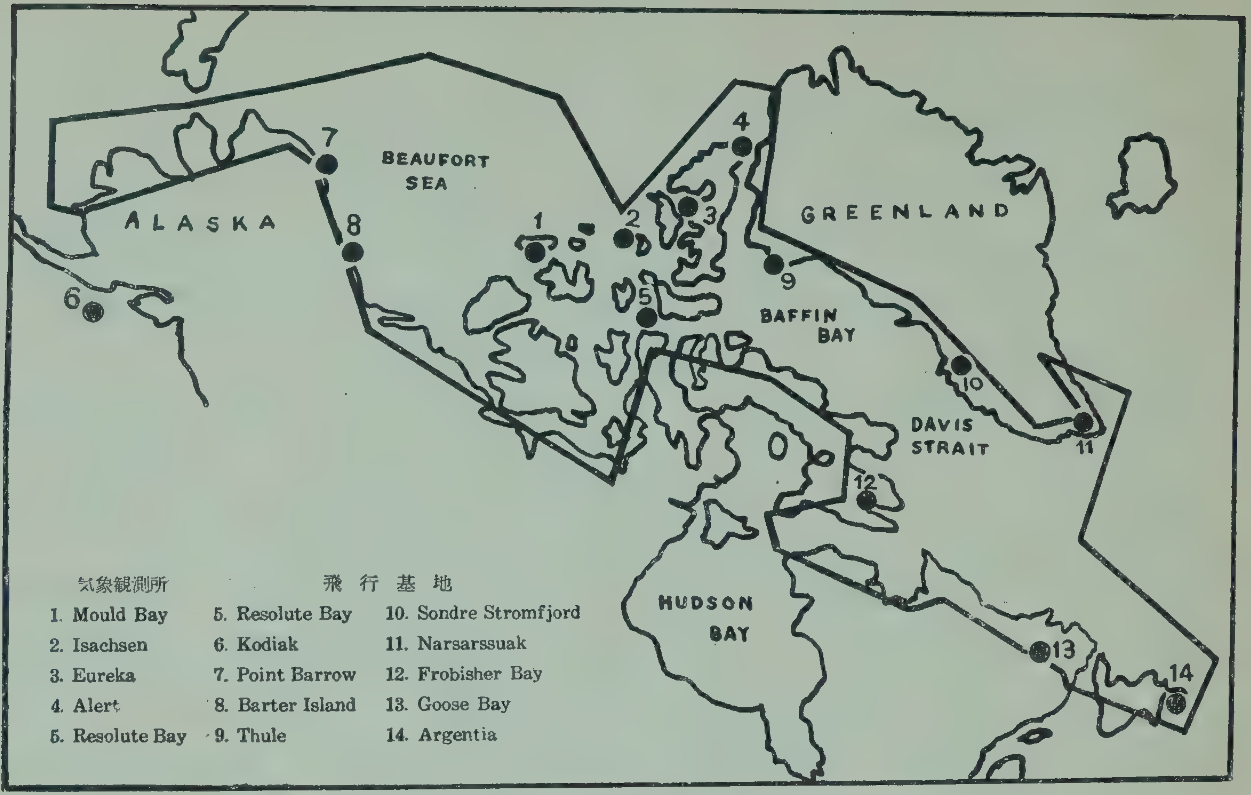
第 1 図には 1953 年のアメリカの飛行機観測区域，飛行場，測候所の位置をしめしておいた。

この図に示されている Beaufort 海については従来あまり観測されていない。近年になつて Crary, Cotell and Oliver (1952)54) が飛行機で氷上に着陸し，水深，氷の運動，重力計による氷の上下振動 (0.05 cm の振幅，5～40 sec の週期) の測定がある。さらに氷上着陸により海況を調べた (Projeck Skijump) Worthington (1953)55) の報告がある。

iv) 日本近海

わが国の近海ではなんといつてもオホツク海の海氷が最も発達している。これに対して僅かに北海道のオホツク海沿岸の観測所で陸上からの観測がおこなわれているにすぎない。したがつてオホツク海全体にわたる氷況が不明なのはまことに残念である。これらの観測データ自身はくわしく発表されていないが，毎冬の氷状の概況として気象台や水路部の海氷研究者の手によつてまとめられている。

1952/53 年の冬季については加藤 (1953)56)，沢田 (1954)57) が，1953/54 年については，沢田



第 1 圖　カナダ北極の海氷観測区域 (1953 年), 飛行基地および気象観測所の分布図。(Bates *et al*, 1954 による)

(1955)[58] が報告している。さらに 1935–43 年に旧海軍が中心となつて行なつたオホツク海の相当広い面積の観測が倉品 (1954)[59] によつてまとめられた。わが国の飛行機観測の先駆者である根岸錦藏氏 (中央気象台嘱託) の観測資料の一部がこのほど函館海洋気象台 (1955)[60] の手によつて刊行された。

また沢田 (1955)[61] はわが国の海氷観測の歴史について詳細にのべており，福富 (1954)[62] は北海道オホツク海沿岸の海氷について概況を試みている。福富・楠・田畑 (1954)[63] は 1942 年から毎冬オホツク海岸の網走，紋別などで数日から 20 日間位にわたつて海氷の現地観測をおこなつてきた。この間の氷状 (海岸から数浬の範囲) について氷状図や写真によつてのべている。

v)　南　氷　洋

南氷洋の氷については従来の海洋探検や極地探検によつてしばしば報告されている。しかし北半球の氷ほどに航海などに密接な関係はなく，捕鯨船などが接近するにすぎない。とくにイギリスでは古くから Discovery Committee が南氷洋の研究に力を注いできている。Herdman (1953)[64] は 1932 年から 1951 年までの "Discovery II 号" による 16 回の航海観測から大陸周辺の海氷状況や水温分布についてのべた。またイギリス気象台発行の "Marine Observer" には毎年の南半球の海氷，氷山などの報告がのつている。

以上で海氷状況に関する総観的な立場の研究についてのべておいた。海氷の観測方法，術語，海洋や大気との相互作用などについてはまだ記述に不充分の点が多い。とくに観測器械な

どは全くふれていないが，次項以下の海氷の基礎的性質の研究についてのべる際に測器の問題を論ずることにする。さらに海氷の総観的研究には海氷予報（氷量，生長，融解移動など）も当然含まれるわけであるがこれもあとで述べることにする。

III. 海氷の基礎的性質に關する研究

海氷は純氷，濃縮された塩類溶液 (brine) (低温度では塩類の結晶が析出する)，ガス，その他（無機物質としての砂泥など，有機物質としてのプランクトン，バクテリヤなど）からなる複雑な物質である。これからわかるように海氷は固体・液体・気体の3相から成立つている。したがつて淡水氷とは基礎的性質がかなり異なつている。天然状態の海氷は海上に浮んで，暖かい海水と冷たい大気とのあいだにあつて氷中に温度傾度が存在し，重力の作用もうけている。つまり平衡状態にある結氷前や，融解後の海水とことなつた非可逆過程の状態にあるのが海氷である。そこでまず海氷が生成されるときの2, 3の問題をのべておく。

1. 海氷の生成に関する研究

海氷の生成については，広い面積にわたつての結氷生成と，海水自身の凍結（つまり氷晶の生成）とにわけて考えた方がよいと思われる。

海氷の生成については海氷予報や海況や気象の synoptic な研究という点で大切である。すでに海氷観測に関連して，これらの問題が取扱われてきた。ここでは最近の研究として Rodhe (1952)65) の報告をあげておく。彼はバルチック海の塩分量は少ないので結氷点は 0°C と考え，周囲が殆んど閉ぢているので水温は主に気温に支配されるとした。したがつて結氷を論ずるには通常水温を調べるのであるが，気温について研究した。気温と結氷との関係は Östman (1950)66)，Nusser36)，Palosuo (1951) が論じているが，気温が 0°C 以下の積算温度 (frost-sum)，結氷前の 0°C 以下の日数，平均気温などを関係付けている。Rodhe は気温と水温の差による海面からの熱放出を考えた，これは福富 (1950)67) と同じである。気温を T，水温を τ，時間を t とすれば基本式

$$\frac{d\tau}{dt} = k(T-\tau)$$

が成立する。ここで k^{-1} は時間の dimension をもつている。Rodhe は k^{-1} と水温 τ との関係を論じた。したがつて海の深さや，海面での放熱係数については考慮していない点は福富と異なる。さらに結氷の予報のために，結氷前の気温のデータを調和解析によつて統計的処理をおこない k^{-1} との関係を論じている。

海氷の生成に際してはある海面からの熱放散を考える必要がある。Zubov (1945)68) は海氷生成までに海面から失われる熱量 Q を

$$Q = \sum_{i=1}^{i=D} R_i \, d_i$$

と表わした。ここで $R_i = i$ 日に失われる熱量 (kg cal/cm²)，$d_i = i$ day，D＝結氷初日。このよう

な Q の大きな海域を凍結の中心と名付けているが，定量的な考察はしていない。その後 Defant (1949)[69] も同様の考えで，海面の冷却，蒸発，海氷生成による密度の増加でおこる垂直循環を考え，バレンツ海の陸棚に応用している。さらにこれらの考えを米国水路部では改良して結氷初日と氷厚の予報に用いている (Calloway and Kaminski, 1954)[70]。これによると結氷前の水温と塩分の測定から Q を求めている。

氷厚の増加については従来は Stefan の式：氷厚を I (cm)，気温 T (°C)，時間 t，氷の熱伝導度 K_i，潜熱 L，密度 ρ_i とすれば

$$I^2 = \frac{2k_i}{L\rho_i}\int T\,dt \tag{1}$$

で表わされるものが多く用いられた。ソヴエトにおいても(3)式をいくらか変形した次の式がだされていた。

$$\left.\begin{aligned} I^2+50\,I &= 8\,R && \text{(Zubov, 1945)} \\ I &= 1.33\,R^{0.58} && \text{(V. V. Lebedev, 1938)} \\ I &= 2.15\,R^{0.515} && \text{(Karelin)} \end{aligned}\right\}$$

ここで R は0°C 以下の日平均気温の和（積算寒度）で $\int T\,dt$ に等しい。しかし氷厚の増加にあたつて積雪の影響は無視できないし，水温，風なども関係してくる。とくに積雪の影響については Kolesnikov (1940) が論じている。米国水路部の L. Simpson と O. Lee は積雪の影響（氷厚増加をさせないような保熱の作用）を考慮して次の式を導いた。

$$t = \frac{1}{\varDelta T\,K_i}\left[0.036\,I_i^2 + \left(0.072\,\frac{K_i\,I_s}{K_s} - \frac{Q_T}{2}\right)I_i + \frac{K_i\,I_s}{K_s}\,Q_T\right]$$

t ＝ 氷厚 I_i (cm) の氷ができるまでの時間，
$\varDelta T$ ＝ 氷または雪面と水温との温度差 (°C)
I_i ＝ 氷厚 (cm)
K_i ＝ 氷の熱伝導度
K_s ＝ 雪の熱伝導度
Q_T ＝ 面積 1 cm² の水柱から放出される熱量 kg Cal。

この式によつて1953年暮の観測とよく合うことを見出している。このような氷厚増加の考え方には積算温度が大きな因子となつて予報に役立つている。氷厚増加の問題は境界が時間とともに変化するので熱伝導論でも厄介な問題の1つになつている。小倉 (1952)[71] は結氷表面で，Newton の法則による熱放出を考慮し次の式を導いた。

$$I = -\frac{K_i}{a} + \sqrt{\left(\frac{K_i}{a}\right)^2 - \frac{2K_i}{L\rho_i}\int_0^t T(t)\,dt} \tag{2}$$

ここで a は放熱係数，$T(t)$ は表面から充分はなれた点の気温。(~~6~~ 2) 式で $a\to\infty$ とすれば (1) 式と同じになる。(2) 式によつて K. Neumann (1949)[72] の実験とよく合うことを見出している。ま

た α と風速との関係を求めている。α は風速 1 m/sec で 20 cal/m^2·deg·hr，5 m sec で 70 となつている。

海氷の凍結については実験室内でおこなつた荒川・樋口 (1954)[73]，Breitner (1948)[74] の実験がある。荒川は NaCl の 0.3%，3% 溶液を凍結させ樹枝状，針状，円板状の氷晶を認めている。Breitner も NaCl を用いその後有機物，染料等も用いて凍結させ，対流の影響が結晶形や氷厚増加に影響することをのべている (1953 a[75]，1953 b[76])。1955 年 2 月に北海道紋別において筆者等は海氷観測をおこなつた。その時一行の一人鈴木は海面に生ずる氷晶の写真撮影をおこなつた。偏光光源と Reflex-box を用いる方法で，現場の海水について直接氷晶を撮影したのは最初ではないかと思われる (Suzuki, 1955)[77]。

2. 海氷の物理的化学的性質

海氷の物理的性質については，その熱的性質については Malmgren (1927)[78]，力学的性質についてはソヴエトの多くの研究者によつてなされてきた (Veynberg, 1940[79]；Zubov, 1945)。

筆者らは，海氷の物理的性質を支配する重要因子であるブラインについて研究してきた。とくに北海道沿岸のような低緯度の海氷は，温度がさほど低くないので液相部分が氷中のかなりを占めている。したがつて，海氷の塩分量を測定するために試料を採取するときブラインの脱落があると塩分量が真の値より少なくでてくることになる。この点について，2, 3 の検討を試み，手動ドリルを考案しかなりの成績を収めている (Kusunoki and Tabata, 1954[80]；楠・田畑 1954[81])。このような問題はわが国以外では多くは低温度の海氷について研究しているため論議されていないようである。Dichtel and Lundquist (1951)[82] はアラスカの Point Barrow において 1948/49 の各海氷の塩分量，氷温，構造，電気抵抗などを測定した。この地方の気温は，−50°C にも低下するので，前述の試料採取の際のブライン脱落などは殆んど問題にならないようである。彼等の測定で表層附近に塩分量の多い層が見出されている。これに対して，冷却効果の大きい日に 10 cm 位の厚さの氷では表面に塩類結晶が "brine flower" として析出してくる。また氷の表面では昇華もおこなわれる。やがて降雪があつて塩分の多い層が中間に形成されると考えている。海氷中の塩分量については古くから多くの論議がなされているが，海氷は不均質な物質であつて氷層の垂直方向にも水平方向にも塩分分布は一様でない。さらに氷温や熱履歴が測定時の塩分量にきいてきている。これらの点について，筆者らは北海道オホツク海岸で研究を進めており，2, 3 の結果がえられている (Kusunoki, 1955)[83]。

海氷の塩分量という言葉を用いてきたが，塩分量は海水の塩分量と同様に考えて用いられている術語であるので多少の問題がある。すなわち海水においては塩分量 S は塩素量 Cl との間に

$$S = 0.030 + 1.805\,\mathrm{Cl}\,(‰) \qquad (3)$$

の関係 (Knudsen の式) で結ばれており，S, Cl はともに定義された量である。海水中の塩類組

成が凍結過程において海水のそれと異なつた組成をとることがあれば，(3) の関係は成立しない。事実海水においても低塩分のときには(3)式の関係はあてはまらないし，すでに Chlorosity $(g/L_{20^\circ C})$ なる量が海水の化学を論ずる場合に用いられている (Sverdrup *et al*, 1942)[84]。海氷においても (3) のごとき関係はさほど激しく変つてはいないであろうが，塩素量または Chlorosity を用いた方がよいと考えられる。

ところで，海水は種々の塩類を含んでおりこれが凍結すると一部は結氷中にブラインとなつて残り，その他は氷の外えおしだされる。この時温度が低下するにつれ，氷以外の塩類の固相が析出してくる。この問題はかつて Ringer (1906) が実験してから手がつけられなかつた。最近 Nelson and Thompson (1954)[85] は海水を容器に入れ冷蔵庫内で凍らせ氷やその他の固相の析出状況を調べた。これによると −40°C まで凍結させたが，−8.2°C で最初の塩類である $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ が析出し，−6 °C ですでに最初の海水の 80% は氷になり，それ以下の温度では氷の生成量はきわめてわずかである。−22.9°C で $NaCl \cdot 2H_2O$ の析出が起り，−36.0°C ではブライン中の Mg や K の濃度が少なくなる。これは KCl や $MgCl_2 \cdot 12H_2O$ が析出するためである。熱分析によつて −54°C で $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ の析出があり，残液も −54°C 以下わずかのところで固化するであろうと結論した。なお，−22.9°C でのブライン量は最初のわずか 2% にすぎない。この実験では結氷点をはじめ，ブライン量，Na，Mg，Ca，K，Cl，SO_4 のイオンを定量分析した。結氷点 (T) と塩素量 (Cl) との関係を次の式で導いた。

$$T = -0.0966\,Cl - 0.0000052\,Cl^3 \qquad (\text{但し } Cl < 50‰)$$

$$T = -0.0966\,Cl - 0.0000035\,Cl^3 \qquad (50 < Cl < 140‰)$$

塩類析出の問題は特来実地の海氷について測定すれば，なお興味ある結果がえられるものと思われる。

以上の諸問題は海氷の熱学的性質に関連していると考えてよいであろう。海氷の熱に関する諸常数の測定は Malmgren の研究以降ほとんどなされていないが，ソヴエトでは上述の塩分量や温度と諸常数の関係のほかに，氷中の空気量やガス量を考慮している。たとえば熱伝導度などは空気によつてかなり左右されることが見出されているが，この点についても今後研究すべき点が残されている。つぎに力学的な研究についてのべる。

海氷の力学的性質を知ることは，航海，氷上渡渉，飛行機着陸，港湾工学などと関連して大きな問題となつている。海氷自身についての力学的，機械的性質の測定はあまりないようであるが，河氷，湖氷，その他の陸氷などを含めるとかなり研究が行なわれている。まず筆者らは，海氷の粘弾性係数の測定を数年前から行なつている。とくに北海道オホツク海岸の沿岸結氷は測定のために試料を切出し空中に持ちあげるとブラインが落下してしまい，もとの現場にはつたままの状態と全く変つてしまう。この難点があるため、現場において結氷中の柱を切り残し，その柱に荷重を加え変形量を時間とともに測定する方法をとつている（福富・楠・田畑[63]；

Tabata, 1955 a86)；田畑, 1955 b87))。この結果粘性係数として$4\sim12\times10^{11}$ dyne·min/cm^2，弾性係数（ヤング率）$2\sim11\times10^{10}$ dyne/cm^{2}をえている。しかし温度，塩分量，氷の構造などとの関係はまだ求められていない。

ところで，海氷や陸氷の粘弾性係数の測定に弾性波を用いる方法がある。これは氷河や極地の ice cap の厚さを測定するのに応用されている。かつて，Ewing, Crary (1934)88),89) は氷の柱や湖の氷のなかの弾性波の速度を測定しているが，その後彼等は北氷洋の海氷についても行なつた。その結果ヤング率$5.4\sim6\times10^{10}$ dyne/cm^{2}を見出している (Oliver, Crary and Cotell, 1954)90)。Ewing 等は最近地震学で話題となつている coupled wave（流体—海水や空気と固体との coupling）の研究で有名であり，氷中の flexural wave と空中の音波との coupling を理論および実験的に研究している (Press and Ewing, 1951)91)。

ここで少し方向を変えて，海に浮んでいる氷と波との問題をみてみよう。波浪が流氷域に入るとかなり早く鎮圧されることはよく経験するところである。また波の予報の問題と関連して流氷域の波の予報は何も障害物のない海洋とは異なつてくるわけである。これらの点について Shapiro and Simpson (1953)92) は氷原に波が入ると波の周期が短かく氷厚が大であるほど伝播されにくいという経験的事実を理論的に説明した。また Keller and Goldstein (1951)93) は波の氷塊による反射を浅い海について理論的に取扱つている。

海氷の電気的性質についてはすでに Dichtel と Lundquist が取扱つていることをのべておいた。これと類似の研究は Bruns がすでにおこなつている (Zubov, 1945)。Dichtel と Lundquist は抵抗値として$3\times10^6\sim3\times10^3$ ohm-cm をえた。抵抗の最大は低温度で結晶主軸に直角な方向について測定したときにえられた。氷温がいちど高くなつたあとで抵抗値が変化したことから，温度変化によつて brine cell の配置が変ることが推察された。また物理探査で大地の電気抵抗を測定して，種々の地層の厚さが決定されている。このとき用いられる Gish-Rooney の電位測定方式によつて氷厚を測定したがうまく行かなかつた。

氷厚を測定するために，氷を切ることなくそのままの状態で氷厚が求められることは大いに望ましい。このため上記の電位差測定も1つの試みであつたわけである。近年金属板の厚さや内部の欠陥の探査に超音波が用いられている。この方法を氷に応用した例がある。磁歪を利用して周波数58 KC の超音波を氷の表面で発振し，底面からの反射を測定するのである。発振部分と氷の接触について難点があり，海氷について（厚さ1.3 m と10 cm）は不成功であつたが，淡水湖氷については反射波のエネルギーは大きかつたが，ノイズが時々現われ正確な厚さは測定できなかつた。これは海氷の不均質性，氷と海水との境界の不連続の程度があまり明瞭でない，氷中での減衰が大きく反射波のエネルギーがとらえにくいなどに原因している (Bowen, Jr. 1950)94)。

このほか海氷の物理的性質には輻射に関して問題が残されているが，さいきんこの種の研究はなされていないようである。氷温は熱輻射とも関連があるので最近の1測定をあげておく。Holtsmark (1955)95) は1949年の春，Point Barrow において氷上積雪を中心として温度の垂直分布をこまかく測定している。積雪が10 cm では氷厚約180 cm，積雪60 cm で氷厚が135 cm となつていることから積雪の海氷生長に対する熱絶縁の状態を調べたわけである。氷中85 cm から空中2 m までを，とくに氷表面と積雪部に密にサーミスターを設置し温度の測定をした。氷厚は約1 m。また氷厚と積雪深を連続して記載し，積雪がない氷の生長は積雪2 m の氷の生長の約50% 大きいことを見出した。このような氷の表面附近の熱収支の観測は今後大いに致さなければならないと考えている。

この項を終えるにあたつて California の Rancho Santa Fe で1952年7月に海洋測器に関する Symposium が開かれ，そのとき Barnes が海氷に関してのべているので紹介しておく。海洋測器という点から海氷の研究には，船舶(砕氷船)，潜水艦，飛行機，陸(氷)上車，観測所，航海や氷探査のための電子測器などについてのべている。これらは現在海洋学の研究で用いられるものが殆んどそのまま用いられるとのべ，海氷の物理的・化学的性質については米国では研究者も研究機関も少ないと云つている。これに対して Lyon, Holmes, Metcalf が討論をおこなつている。Lyon は海水の凍結槽を作り物理的性質の研究に取りかかつた (Barnes, 1954)96)*。

IV. 海氷豫報に關する研究

前項までのべてきた基礎的な研究や，氷状観測によつて実生活に関係の深い海氷予報がなされなければならない。海氷予報と一口にいつても多くの項目がある。すなわち流結氷初終日，完全結氷初終日，航海不能日数等の季節学的なものもあれば，氷量，氷厚，移動，融解などの問題もある。さらに大気や海洋との相関も大切である。本稿ではすでに氷況に関する研究，基礎的性質の研究の項においてそれらの2, 3に触れている。海氷予報について古い歴史をもつているソヴエトにおいては，最近ではオホツク海や太平洋北部においても予報をおこなつているものと考えられるが，残念ながらその詳細は不明である。わずかに1945年頃までの様子が Zubov の *L'dy Arkti* (北氷洋の氷) や Armstrong (1955)97)**の“ソヴエトの海氷予報”に関する報告で窺える程度である。

まず海氷予報の対象である各海域について考えると，バルチック海ではすでに Nusser や Rodhe の既述の報告がある。北氷洋については前述の通りであり，北米では Bates *et al* (1954) が結氷初日と氷厚について予報されていることを報告している。わが国にとつて最も関心の深いオホツク海については福富に楠・田畑の統計的な研究がある。この研究では北海道沿岸の網

---

* 鈴木義男・楠宏によつて訳出され“雪氷”に紹介の予定。

** 筆者の拙訳が“雪氷”第17巻，1号にある。

走や根室測候所の資料によるのみでオホツク海全域についてのものではない。オホツク海北方域については Kudryavaya (1946)[98], (1951)[99] の研究がある。彼は海氷出現日の平均からの偏差を ΔZ とすれば ΔZ は気象要素と次の関係にあると考えた。

$$\Delta Z = f(\Delta T^{\text{air}}_{\text{aut}};\ \Delta T^{\text{water}}_{\text{aut}};\ \Delta P_{\text{aut}})$$

ただし，ΔT：気温や水温の秋の各月の偏差，ΔP は気圧の偏差。たとえば Okhotsk の結氷初日の予報式は

$$\Delta Z = A_2\,\Delta T^{0}_{\text{IX}} + B_2\,\Delta T^{0}_{\text{V+VI}} + C_2\,\Delta P^{\text{V}}_{\text{IX}}$$

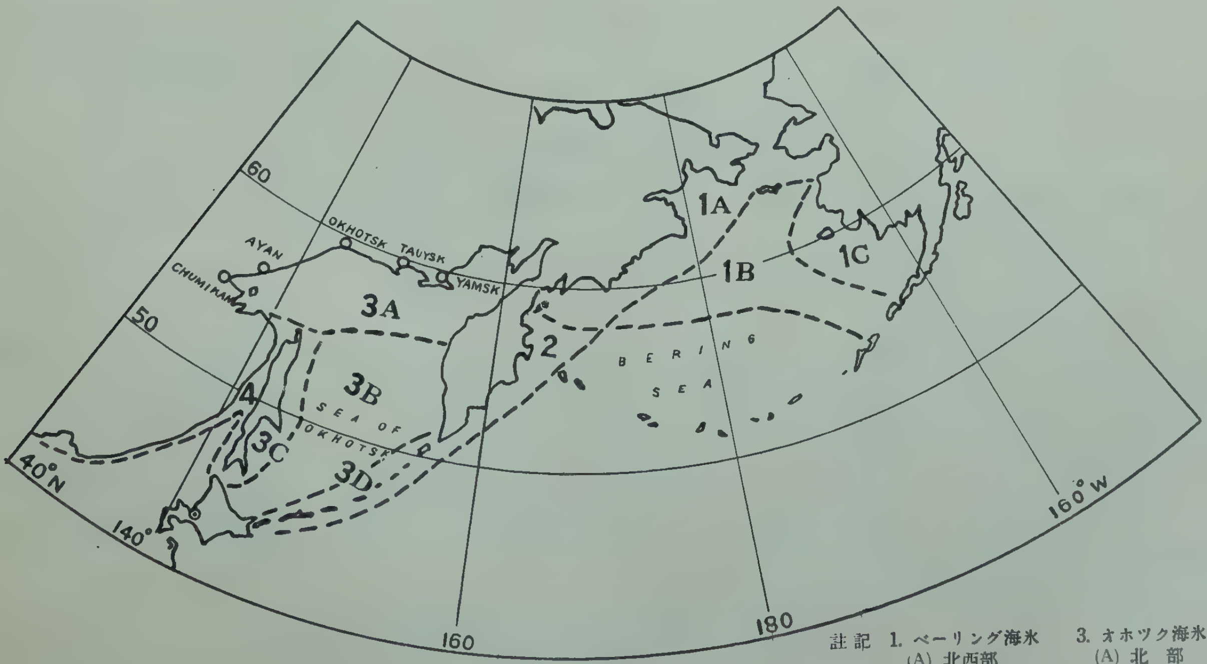
ここで ΔT^{0}_{IX} は 9 月の平均気温からの偏差，$\Delta T^{0}_{\text{V+VI}}$ は 5 月と 6 月の平均気温の和からの偏差でともに Okhotsk の値；$\Delta P^{\text{V}}_{\text{IX}}$ は Verkhoyansk の 9 月の月平均気圧からの偏差で，A_2, B_2, C_2 は常数，結局水温は予報に用いていない。さらに氷量 4 以上になる期日の予報式は Ayan において：

$$\Delta Z = A_1\,\Delta T^{\text{Ya}}_{\text{VI}} + B_1\,\Delta T^{\text{Ya}}_{\text{VIII}}$$

Ya は Yakutsk の気温をしめす。さらに解氷期についても同様に行い，たとえばカムチャッカ半島の南西部については

$$\Delta Z = A_4\,\Delta T^{\text{P}}_{\text{II}} + B_4\,\Delta T^{\text{P}}_{\text{III}}$$

を求めている。ここで ΔT^{P} は Petropavlovsk の気温である。そして 1～2 箇月前に 80～90% の的中率をもつているとのべている。この方法の中心となる考え方は極東の気象状況を Synoptic にとらえ，寒冷域や気圧配置から各年の氷状と関係付けていることにある。



註記
1. ベーリング海氷
(A) 北西部
(B) 中心部
(C) 東　部
2. カムチヤツカ海氷
3. オホツク海氷
(A) 北　部
(B) 中心部
(C) 樺太側
(D) 千島列島部
4. 日本海沿岸海氷

第 2 圖　太平洋北部の氷状の地理的区分。(D.B. Karelin による)

なお，Karelin はオホツク海や北太平洋の氷の地理的分布を第2図のように区分した。この図によつて Kudryavaya の予報域をしめすと主に 3A の地域になつている。この図にはオホツク海は4区域にわけられている。これも氷の地理的分布から見た1分類法といえよう。Kudryavaya の予報した地点も示しておいた。

海氷予報のなかで興味のある問題は海氷の風や海流による移動であろう。これについて詳細にのべることはさけるが，ソヴエトでは Zubov 等の“等圧線漂流”説が一般的のようである。これは北氷洋のごとく高緯度では風は地衡風で与えられる。すなわち風速 (W) は：

$$W = -\frac{1}{2\omega\rho\sin\varphi}\frac{\partial p}{\partial x}$$

ここで ω：地球自転の角速度，ρ：空気の密度，φ：緯度 (北極地方では $\sin\varphi \doteqdot 1$)，$\partial p/\partial x$：気圧傾度。さて実際に観測される地上風速 (W_0) と地衡風速との関係は Brunt, Khromov, Efremov 等のものを用いて次のようになる：

$$W_0 = 0.5\ W, \qquad c = 0.02\ W_0$$

c：氷の風による漂流速度。0.02 という値は Zubov が多くの測定値から得たもの。結局北氷洋の中心部では次のようになる：

$$c = 13000\,\frac{\partial p}{\partial x}$$

ただし，c：km/Month，$\partial p/\partial x$：mb/km で表わしてある。漂流方向も Nansen は風下に約 28° 右偏すると見出したが，北氷洋では風向は等圧線に左へ同じ角度偏しているので結局等圧線と一致して氷が流れることになる。このような考え方はオホツク海のような中緯度の風系には適用できないであろう。とくに冬期間の高低気圧の通過に伴なう氷の移動がはげしい。この点について今後の研究が必要と考えられる。なお，Winchester (1952)[100] がカナダ北方海域について風と氷の漂流について考察していることを附言しておく。

海氷の融解に関する予報はあまり行われていないようである。前述の Kudryavaya がオホツク海の解氷について予報していることはすでにのべた。ところでソヴエトの研究者は氷厚増加に積算気温が第1因子であつたように，融解についても同様に考えている。山地積雪の融解においても積算気温がよく用いられていることは周知の通りである。Karelin (1940)[101] は次の式で氷厚減少量 (h cm) をあらわした：

$$h = 0.51\,(\sum t - 32)$$

ただし $\sum t = -5$℃ 以上の日平均気温の積算。このような考え方が今日でも基礎になつているのではないかと思われる。しかし積雪深や局地状況も考慮しなければならぬのは当然であろう。

II, III, IV の各項——海水の狀況，基礎的性質，予報——で最近の海氷研究について不充分ではあるが通観してきた。稿を終えるにあたつて，1946 年からアメリカ空軍によつて発見された北氷洋を漂流する“氷の島”(Ice Islands) と 1954 年 4 月に北氷洋の pack ice 上に観測所を設けて漂流しながら研究をすすめているソヴエトの様子をつぎにのべておく。

V. 北氷洋における最近の研究

北氷洋は目下アメリカとソヴエト両国の研究の対象になつている。とくに最近の話題である“氷の島”についてまず述べておく。

1946 年 8 月 14 日にアメリカ空軍がアラスカの Point Barrow 沖 300 mile にレーダーで普通の極氷と全く異なつた氷を見付けた。これは T1 (Radar Target の T をとる) と名付けられた。その後多数の氷の島が発見されたが，まず T1, 2, 3 が現在まで有名なものである。これらの位置，大きさなどについて第 4 表でしめす (Koenig *et al*, 1952)[102]。

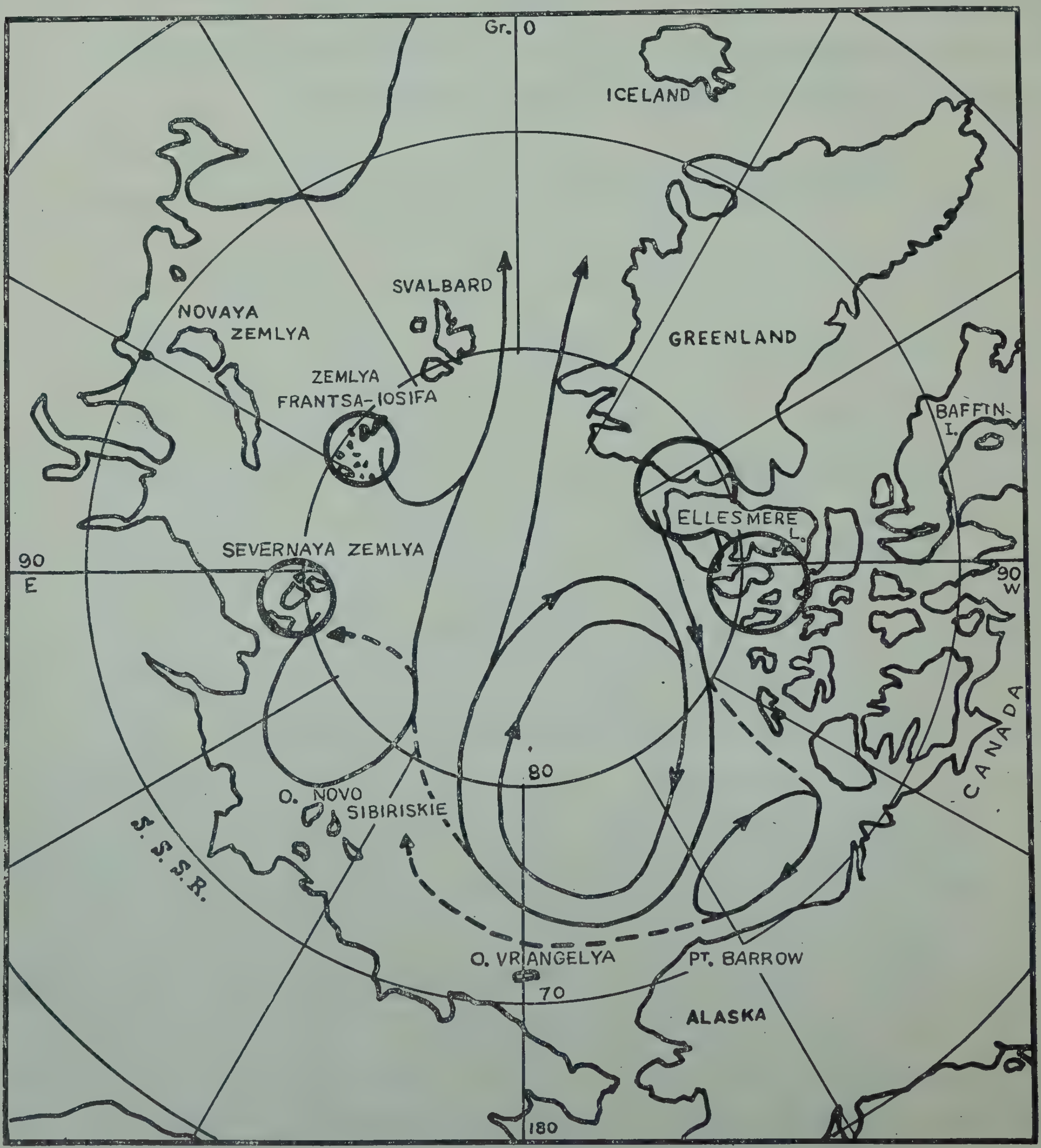
第 4 表 Ice Islands の諸要素 (Koenig *et al*; Crary *et al*, 1952)

	T1	T2	T3
発見月日	1946 年 8 月 16 日	1950 年 7 月 19 日	1950 年 7 月 29 日
発見当時の位置	76°15′N 160°15′W	86°40′N 167°00 E	75°24′N 173°00 W
表面積	24×29 km^2	27×29 km^2	7×14.5 km^2
氷厚 (実測)	—	—	平均 60 m 最大 75 m
海面上の高さ (実測)	—	—	最大 12 m

第 4 表にしめした T3 の氷厚その他の実測は 1952 年 3 月 19 日に C-47 で着陸し，その後前項にのべた Crary や Cotell が氷厚測定などに従事した。T3 には気象観測所も設けられ種々の調査が続けられた (Crary, cotell and Sexton, 1952)[103]。氷の島は現在は，北アメリカ側と北極中心との間の時計廻りの流れにのつてグリーンランドや，カナダ北極群島の附近に近接している。カナダ北極群島の間には航空写真の調査から多数の氷の島が存在していることがわかつた (Montgomery, 1952)[104]。これらの島の発生地はカラダ北部とくに Ellesmere 島の沿岸で，ここに生じた ice shelf がかけて海にでたものである。

ところでこれらの島はすでにソヴエトの氷狀偵察において発見されていたと Burkhanov (1954)[105] がのべている。これによると昔北氷洋で航海者がよく未知の島を発見したと報告し，その後調査すると見つからなかつたという例が多いことがあつた。たとえば新シベリア諸島の北方にあるといわれた Sannikov 島 (1811 年) は遂に再発見されず，これは“氷の島”であつたものと考えられている。さて Burkhanov は前述の T1 を I. S. Kotov が 1946 年 3 月に 76°N, 165°W の地点でみつけた 25×30 km の氷の島と同じであるという (Krest'yank の島と命名)。また T2 については 1948 年 4 月に I. P. Mazuruk が 82°, 170°E で (28×32 km); T3 は 1950 年 3 月に V. M. Perov が 74°30′, 169°W でみつけた 100 km^2 の島と同じである。このほかソヴエト海域にはいくつかの氷の島が発見されている。氷の発生地は Ellesmere 島のほかにセヴェルナヤ・ゼムリヤやフランツヨゼフ島がある。これら氷の島の漂流経路については Bukhanov105) や Zubov (1955)106) が論じている。

氷の島の成因については不明の点が多く，Koenig 等をはじめ Debenham (1954)107), Dibner (1955)108) が論じた。T3 からは多くの動植物の遺骸や岩石，砂泥が採集されており，氷中には砂泥の成層がみられる。これらから同位元素の分析による地質年代の決定がなされている，地質



第 3 圖　北氷洋の氷の島 (Ice Islands) の漂流経路 (V.F. Burkhanov. 1954 による)

学的にも興味ある結果が発表されるものと思われる。

氷の島についてはこれ位にして，久しく北氷洋の研究——特に探検について発表のなかつたソヴエトが昨1954年の春から多くの新聞や雑誌で新らしく遂行されている漂流ステーションSP–3, 4号（*Severnyy Polyus*, 北極）の記事が書かれている。北極3号は1954年4月9日，4号は6日に夫々86°00′, 175°45′W；75°48′, 175°25′Wに建設された。一切は飛行機によつて行われ，隊長は3号はA. F. Trëshnikov, 4号はYe, I. Tolstikovである。これらの記事によつてSP–2号はM. M. Somovを隊長（来る国際地理観測年のソヴエト南極探検隊長の予定）とし，1950年4月1日（76°02′, 166°30′W）から1951年4月11日（81°45′, 162°20′W）まで漂流している（SP–1号は1937–38年のパパーニン等の探検である）。これらは総て氷厚2〜3 mの海氷上である。現在SP–3号はグリーンランド近海まで近付いたので観測を中止し，SP–5号がウランゲル島北方に設けられた，隊長はN. A. Volkovである。またSP–4号も引上げたものと思われるがその詳細は不明である。これらの探検の中心となつているのは，Glavsevmorputi（前述のBurkhanovが局長）で，研究者は主に北極研究所（所長M. Ye. Ostrekin）の研究員で占められている。科学アカデミー（Akademiya Nauk SSSR）も地質，地理，海洋の研究者を派遣している（Shcherbakov, 1954[109]；Anon. 1954[110]）。研究は気象観測，海洋観測，水深測量，採泥，地磁気等の広範囲に亘つている。これらの結果のうち2, 3をあげると；新シベリヤ島からグリーンランドにかけて北極を通る海底山脈（Lomonosov海底山脈と命名）が水深4000 mの海盆から海面下1000 m近くまで隆起していることがわかつた（実はT3の漂流や，~~Operation~~ project Skijumpでその存在が暗示されていた）。これにそつての重力や地磁気の変化も調べられた。

海氷は北氷洋でも一番大きな研究対象であるが，結晶構造（Shumskiy, 1955)[111]，強度，凍結と融解の過程，さらに氷が北極近くに漂流すると下方に氷層が生長し，南方へ流れると表面が融け薄くなり，氷の若返りをやつていることなどがわかつた。さらに海水の流動については太平洋側（Lomonosov海底山脈によつて北氷洋は2つに分けられている）には時計廻り，大西洋側には反時計廻りの循流のあることがわかつた。さらに海水中のプランクトン，細菌，底質も調べられた（Klenova, 1955[112]；Gusev, 1955[113]）。これらの詳しい結果も近く発表されることと思われる。この研究によつて北氷洋の海氷に関する知識も一段と増すであろうと考えられる。

VI. 結　　言

最近の海氷研究の動向についてかなり広範囲にわたつて展望を試みた。しかし筆者の論文捗覧の不充分や浅学のため真意をつかみかねた点が多い。また本文も将来性のある問題の提示や指摘などの点で欠けるところが多く，geographicalな問題とmatterとしての海氷の問題との項目区分は不適当であつたかと思う。つぎの機会には個々の問題を捉えて詳細な検討を加えて稿を進めたいと考えている。

わが国の海氷の研究も気象台，水路部，燈台部などの現業官庁における氷状に関する綜観的研究と低温科学研究所などにおける海氷の物理的性質のごとき基礎的研究とにわけられる。この両者は当然相たずさえて，種々の実生活から派生する諸問題の解決にあたらなければならない。その目的とするところは，日本近海の海氷の季節学的予報からはじまつて広範な海況，気象予報に進展するものと考えられる。不幸にして現在まで海氷研究で経験の深いソヴエトの論文に接する機会がなかつたことは研究上の大きな障害であつたが，今後は漸次このような障害も氷解して行くものと思われる。また今次大戦後のアメリカ・カナダの海氷研究に今後大いに注目すべきであると思われる。アメリカでは海氷のみならず雪や氷の研究も近年に至つて活潑となり，関係する研究所，大学，民間団体など合せて大小100有余をかぞえているから今後の発展は著しいものであろうと推察される。

来る1957–58年の国際地球観測年にはわが国からも南極観測隊が派遣される，この機会に雪や氷に対して研究者のみならず多くの人々の関心が高まることを祈つてやまない。

文献

1) Zukriegel, J. 1935 Cryologia Maris. Trav. Géogr. Tchèques. ***15***, Praha, 177 p.

2) Chapmann, S. 1955 Scientific programme of the International Geophysical Year 1957–58. Nature, ***175***, No. 4453, 402–406.

3) Dansk Meteorologisk Institut 1901– Isforholdene i de Arktiske Have (The State of the Ice in the Arctic Seas). København. 現在まで 1900–1939 年，1946–1951 年の分が出版された。

4) Armstrong, T. 1950 Study of sea ice in the Soviet Arctic, 1920–45. Polar Record, ***5***. 39, 468–473.

5) 日本海洋学会 1955 **海洋観測指針.** (第12章 海氷観測，201–224 p)，252 p.

6) World Meteorological Organization. Commission for Maritime Meteorology, London. 14th–29th July. Abridged Final Report of the First Session. International ice nomenclature, 42–50 p. WMO. No. 10. RP. 2, 108 p.

7) Gakkel', Ya. Ya. 1944 Instruktsiya dla proizvodstva nablyudeniy nad l'dami s korablya (船舶海氷観測指針). Vyp. ***9***, Izd. Glavsevmorputi, Moskva.

8) Glagoleva, M. G. and Istoshin, Yu. V. 1951 O metodike ledovykh nablyudeniy i ikh obrabotke (氷観測とその整理). Meteorologiya i Gidrologiya (気象学と水文学), No. 1.

9) Karelin, D. B. and Petrichenko, A. N. 1942 Instruktsiya po nablyudeniyam nad l'dami s korablya i pravila sostavleniya ledovykh doneseniy dlya sudovoditeley (船舶氷状観測指針と船長の氷状報告記載規則). Izd. Glavsevmorputi.

10) Karelin, D. B., N. A. Kolkov, P. A. Gordienko and V. V. Zhadrinskiy 1946 Ledovaya aviatsionnaya razvedka (空中氷状観測法). Izd. Glavsevmorputi, Moskva, 152 p.

11) Petrichenko, A. N. 1944 Instruktsiya dlya proizvodstva nablyudeniy nad l'dami na nolyarnykh stantsiyakh (極地観測所の海氷観測実施指針). Vyp. ***8***, Izd. Glavsevmorputi, Moskva.

12) Smesov, A. N. 1944 Instruktsiya po instrumental'nomu opredeleniyu skorosti i napravleniya dreyfa l'dov s berega (沿岸からの氷の漂流速度と方向の器械測定指針). Vyp. ***12***, Izd. Glavsevmorputi, Moskva.

13) Instruktsiya dlya nablyudeniya nad l'dami na polyarnykh stantsiyakh. (極地観測所における氷観測指針). Izd. Glavsevmorputi, 1944.

14) Rukovodstvo dlya nablyudeniy nad l'dami arkticheskikh morey, rek i ozer na polyarnykh gidrometeorologicheskikh stantsiyakh (極地水理気象観測所における北極海域・河川・湖沼の氷の観測指針). Seriya "Posobiya i rykovodstva" (参考および手引シリーズ), Vyp. ***31***, Izd. Glavsevmorputi, Leningrad-Moskva. 1953.

15) Instruktsiya dlya proizvodstva beregovykh i ekskursionnykh nablyudeniy nad ledyanym

pokrovom na moryakh (海氷の沿岸及び探検観測指針). Gidrometeoizdat, 1940.

16) Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam (水理気象ステーションおよびポストの指令). Ledovyye nablyudeniya (氷状観測). Gidrometeoizdat, Leningrad, 1949.
同　上　vyp. ***3***, Ch. I. 1946.
同　上　vyp. ***9***, Ch. I. 1948.
同　上　vyp. ***9***, Ch. II. 1948.
同　上　vyp. ***2***, Ch. III. 1948.

17) Rukovodstvo po proizvodstvu inspektsii morskikh gidrometeorologicheskikh stantsiy. (海洋水理気象観測所の観測実施指針). Gidrometeoizdat, 1951.

18) Deryugin, K. K. and D. B. Karelin 1954 Ledovyye nablyudeniya na moryakh (海氷観測法). Gidrometeoizdat, Leningrad. 168 p.

19) Nusser, F. 1954 Der Ostseeschlüssel, ein neuer Eisschlüssel. Deut. Hydrogr. Zeit., ***7***, 3/4.

20) U. S. Hydrographic Office 1946 Ice Atlas of the Northern Hemisphere. H. O. Pub. No. 550, 106 p.

21) U. S. Hydrographic Office 1952 A Functional Glossary of Ice Terminology. H. O. Pub. 609. 88 p.

22) U. S. Hydrographic Office 1950 Manual of Ice Seamanship. H. O. Pub. No. 551, 128 p.

23) Maurstad, A. 1935 Atlas of sea ice. Geofys. Publ. ***10***, 11, 17 p.

24) Gakkel', Ya. Ya. and A. F. Laktionov 1940 Al'bom ledovykh obrazovaniy (氷のアルバム). Izd. Glavsevmorputi, Leningrad-Moskva, 76 p.

25) Klassifikatsiya i terminologiya l'dov, vstrechayushchikhsya v mope (海上で遭遇する氷の分類と術語). Gidrometeoizdat, 1954.

26) Golovkov, M. P. 1951 K voprosu o strukturakh prirodnykh l'dov razlichnogo proiskhozhdeniya (起源の異なる自然氷の構造に関する問題). Doklady Akad. Nauk SSSR, ***78***, 3, 573–575.

27) Bates, C. C. and G. Lill 1950 Current naval research in land and sea ice. Trans. Amer. Geophys. Union, ***31***, 2, 278–281.

28) Bates, C. C., H. Kaminski and A. R. Mooney 1954 Development of the U. S. Nary's ice forecasting service, 1947–1953, and its geological implications. Trans. New York Acad. Sci. Ser. II, ***16***, 162–174.

29) 沢田照夫 1950 米国の気象偵察機による海氷通報について. 測候時報, ***22***, 6, 158–161.

30) Nusser, F. 1948 Die Eisverhältnisse des Winters 1947/48 an den deutschen Küsten. Deutsch. Hydrogr. Zeit., ***1***, 4, 149–156.

31) Nusser. F. 1949 Die Eisverhältnisse des Winters 1948/49 an den deutschen Küsten. Ditto, ***2***, 6, 251–255.

32) Nusser, F. 1948 Die Eisverhältnisse des Winters 1949/50 an den deutschen Küsten zwischen Ems und Oder. Ditto, ***3***, 5/6, 335–341.

33) Nusser, F. 1953 Die Eisverhältnisse des Winters 1951/52 an den deutschen Küsten zwischen Ems und Trave. Ditto, ***6***, 2, 77–80.

34) Büdel, J. 1946 Der Eiswinter 1945/46 an den deutschen Küsten (Brit. Zone) im Vergleich zu den Eiswintern 1903/04 bis 1942/43. Unveröff. wiss. Arb. Dtsch. Hydrogr. Inst., Nr. 34.

35) Prahm, G. 1951 Die Abschmelzzeit des Eises an den deutschen Küsten zwischen Ems und Oder. Deutsch. Hydrogr. Zeit., ***4***, 1/2, 17–28.

36) Nusser, F. 1950 Gebiete gleicher Eisvorbereitungszeit an den deutschen Küsten. Ditto, ***3***, 3/4, 220–227.

37) Jurva, R. 1937 Über die Eisverhältnisse des Baltischen Meeres an den Küsten Finnlands nebst einem Atlas. Fennia, ***64***, 1. 248 p.

38) Jurva, R. 1941 Jäätalven normaalivaiheista. Matemaattisten aineiden aikakauskirja, No. 2.

39) Jurva, R. 1950 Sur les conditions de glace de la Baltique le long des côtes de Finlande. Proc. Verb. Int. Ass. Hydrol., 8th Gen. Assembly, Oslo, 1948, ***2***, 33–37.

40) Palosuo, E. 1953 A treatise on severe ice conditions in the central Baltic. Merentutkimuslaitoksen julk., ***156***, 130 p.

41) Simojoki, H. 1952 Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren in den Wintern 1946–50. Ditto, ***154***, 88 p.

42) Simojoki, H. 1953 The time for freezing and ice break-up and the number of ice days on the Finnish coast in the winters of 1934–53. Ditto, ***160***, 18 p.

43) Jurva, R. 1952 On the variations and changes of freezing in the Baltic during the 120 years. Fennia, ***75***.

44) Jurva, R. 1953 An estimation of the annual variations in the maximum extent of ice cover in the Baltic. Geophysica, ***6***.

45) Deutsches Hydrographisches Institut 1950 Atlas der Eisverhältnisse des Nordatlantischen Ozeans und Übersichtskarten der Eisverhältnisse des Nord-und Südpolargebietes. Hamburg, 24 p.+34 charts.

46) Canada. Dept. of Mines and Technical Surveys, Geographical Branch 1951 Canadian Ice Distribution Survey Project presentation. Ottawa, 15 p.

47) Frazer, J. K. 1952 Canadian Ice Distribution Survey. Arctic, ***5***, 3, 195.

48) Hare, K. F. and M. R. Montgomery 1949 Ice, open water, and winter climate in the Eastern Arctic of North America. Arctic. Part I. ***2***, 2, 79–89; Part II. ***2***, 3, 149–164.

49) Dunbar, M. J. 1951 Eastern Arctic Waters. Fish. Res. Bd. Canada, Bull. ***88***, 131 p.

50) Dunbar, Moira 1954 The pattern of ice distribution in Canadian Arctic Seas. Trans. Roy. Soc. Canada. ***48***. Ser. III, 9–18.

51) U. S. Hydrographic Office 1954 Distribution of ice in Baffin Bay and Davis Strait. H. O. Misc. 15891, 49 p.

52) Koch, L. 1945 The East Greenland Ice. Meddel. om Grønland. ***130***, 3, 374 p.

53) Schell, I. I. 1952 Stability and mutual compensation of relationships with the iceberg severity off Newfoundland. Trans. Amer. Geophys. Union. ***33***, 1. 27–31.

54) Crary, A. P., R. D. Cotell and Jack Oliver 1952 Geophysical studies in the Beaufort Sea, 1951 Ditto, ***33***, 2, 211–216.

55) Worthington, L. V. 1953 Oceanographic results of Project Skijump I and Skijump II in the polar sea, 1951–1952. Ditto, ***34***, 4, 543–551.

56) 加藤 泰 1953 昭和27年12月–28年4月における北海道沿岸の海氷について. 水路要報, ***38***, 219–224.

57) 沢田照夫 1954 北海道沿岸海氷報告 (1953). 昭和28年冷害気象調査 (農林協会) 160–162.

58) 沢田照夫 1955 北海道沿岸の海氷 (1954年). 産業気象調査報告, ***18***, 2, 107–115.

59) 倉品昭二 1954 オホーツク海の海氷. 水路要報, ***40***, 1–12.

60) 函館海洋気象台 1955 流氷図 (1937–1944). 43 p.

61) 沢田照夫 1955 海氷観測の歴史と現況. 天気, ***2***, 4, 104–107; 6, 157–160.

62) 福富孝治 1954 北海オホーツク海沿岸の海象と海氷. 網走道立公園知床半島学術調査報告, 19–30.

63) 福富孝治・楠宏・田畑忠司 1954 海氷の研究 (第21報). 北海道オホツク海沿岸の海氷調査, 低温科学, Ser. A, ***13***, 59–103.

64) Herdman, H. F. P. 1953 The Antarctic pack ice in winter. J. of Glaciology, ***2***, 13, 184–191.

65) Rodhe, B. 1952 On the relation between air temperature and ice formation in the Baltic. Geogr. Ann., ***34***, 3/4, 175–202.

66) Östman, C. J. 1950 Om sambandet mellan Köldsummor, isläggning och istjocklek. Medd. f. Sveriges meteorol. och hydrol. inst., Serie A, 1.

67) 福富孝治 1950 海氷の研究 (第3報) 沿岸海氷の生成についての理論的考察. 低温科学, ***3***, 131–142.

68) Zubov, N. N. 1945 L'dy Arktiki (北氷洋の氷). Izd. Glavsevmorputi, Moskva, 360 p.

69) Detant, A. 1949 Konvektion und Eisbereitschaft in Polaren Schelfmeeren. Geogr. Ann. 31, 1–4, 25–35.

70) Calloway, E. and H. Kaminski 1954 Ice thickness forecasting as applied to Davis Strait-Baffin Bay area. Trans. Amer. Geophys. Union (In press).

71) Ogura, Y. 1952 A supplementary note on the problem of ice formation. J. Met. Soc. Japan, ***30***, 7, 231–239.

72) Neumann, K. 1949 Die Wachstumsgeschwindigkeit von Eisdecken in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit. Ann. Met., ***2***, 144–155.

73) 荒川淳・樋口敬二 1954 水溶液の凍結現象. 低温科学, Ser. A. ***12***, 73–81.

74) Breitner, H. J. 1948 Rhythmische Kristallisation beim Gefrieren von Wasser. Kolloid-Zeit. ***111***, 2, 80–82.

75) Breitner, H. J. 1953 *a* Entmischung beim Gefrieren wässeriger Lössungen. Deutsch. Hydrogr. Zeit., 6, 2, 80–86.

76) Breitner, H. J. 1953 *b* Über die Geschwindigkeit des Dickenwachstums von Eisdecken. Ditto ***6***, 1, 34–39.

77) Suzuki, Y. 1955 Observations of ice crystals formed on sea surface. J. Oceanogr. Soc. Japan, **11**, 3 123–126.

78) Malmgren, F. 1927 On the properties of sea-ice. Norwegian North Polar Expedition with the "Maud" 1918–1925. Sci Results, **1**, 5, 67 p.

79) Veynberg, B. B. 1940 Lëd; Svoystva, vozniknoveniye i ischeznoveniye l'da (氷：その性質，生成，消滅). GTI. 524 p.

80) Kusunoki, K. and T. Tabata 1954 Some remarks on the method of sampling of sea ice. Proc. Verb. Int. Ass. Hydrol., 10th Gen. Assembly, Rome (印刷中).

81) 楠宏・田畑忠司 1954 海氷の試料採取方法について. 低溫科学, Ser. A, **12**, 87–94.

82) Dichtel, W. J. and G. A. Lundquist 1951 An investigation into the physical and electrical characteristics of sea ice. Bull. Nat. Res. Council, U.S.A., **122**, 122.

83) Kusunoki. K. 1955 Observation on the horizontal and vertical distribution of chlorinity of sea ice. J. Oceanogr. Soc. Japan, **11**, 4 (In press).

84) Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming 1942 The oceans. Prentice-Hall, Inc., New York. 1060 p.

85) Nelson, K. H. and T. G. Thompson 1954 Deposition of salts from sea water by frigid concentration. J. of Mar. Res., **13**, 2, 166–182.

86) Tabata, T. 1955 *a* A measurement of visco-elastic constants of sea ice. J. Oceanogr. Soc Japan, **11**, 4 (In press).

87) 田畑忠司 1955 *b* 海氷の粘弾性係数の測定. 低溫科学, Ser. A, **14**.

88) Ewing, M., A. P. Crary, and A. M. Thorne 1934 Propagation of elastic waves in ice, pt. I. Physics, **5**, 165–168.

89) Ewing, M., and A. P. Crary. 1934 Ditto. pt. II. Physics, **5**, 181–184.

90) Oliver, J., A. P. Crary and R. Cotell 1954 Elastic waves in Arctic pack ice. Trans. Amer. Geophys. Union, **35**, 2, 282–292.

91) Press, F. and M. Ewing 1951 Theory of air-coupled flexural waves. J. Appl. Phys., **22**, 892–899.

92) Shapiro, A. and L. S. Simpson 1953 The effect of a broken icefield on water waves. Trans. Amer. Geophys. Union, **34**, 1, 36–42.

93) Keller, J. B. and E. Goldstein 1953 Water wave reflection due to surface tension and floating ice. Ditto. 43–48.

94) Bowen, W. A. Jr. 1950 RCA electronic ice gage — evaluation under Arctic conditions. U. S. Naval Civil Eng. Res. Eval. Lab., Tech. Memor. M-004, 13 p.

95) Holtsmark, B. E. 1955 Insulating effect of a snow cover on the growth of young sea ice. Arctic. **8**, 1, 60–65.

96) Barnes, C. A. 1954 Sea ice problems. Oceanographic Instrumentation. Nat. Res. Coun., Pub. 309. 85–100.

97) Armstrong, T. 1955 Soviet work on sea-ice forecasting. Polar Rec., **7**, 49, 302–311.

98) Kudryavaya, K. I. 1946 Osnovnyye polozheniya metodiki dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlya Okhotskogo morya (オホーツク海の長期海氷予報法の基礎論). Trud. Nauch.-Issl. Uchr., Ser. V. **12** (海況予報の諸問題). 37–51.

99) Kudryavaya, K. I. 1951 Morskie gidrologicheskie prognozy (海況予報). Gidrometeoizdat, Leningrad. 276 p.

100) Winchester, J. W. 1952 A study of the movement of arctic sea ice in the Canadian Arctic in relation to meteorological, geographical, and oceanographic parameters. U.S. Navy Dept., 15 p.

101) Karelin, D. B. 1940 Tayaniye l'da v arktike (北極の氷の融解). Prob. Ark. 5, 118–119.

102) Koenig, L. S., K. R. Greenaway, Moira Dunbar and G. Hatlersley-Smith 1952 Arctic ice islands. Arctic, **5**, 2, 67–103.

103) Crary, A. P., R. D. Cotell and T. F. Sexton 1952 Preliminary report on scientific work on "Fletcher's Ice Island", T3. Arctic, **5**, 4, 211–223.

104) Montgomery, M. R. 1952 Further notes on ice islands in the Canadian Arctic. Arctic, **5**, 3, 183–187.

105) Burkhanov, V. F. 1954 Proiskhozhdeniye ledyanykh ostrovov v arktike (北極の氷の島の起源). Voprosy Geografii (地理学の諸問題). **36** (Geomorfologiya), 3–29.

106) Zubov, N. N. 1955 Arkticheskiye ledyanyye ostrova i kharakter ikh dreyfa (北極の氷の島とその漂流). Priroda, ***44***, 2, 37–45.

107) Debenham, C. F. 1954 The ice islands of the Arctic: a hypothesis. Geogr. Rev., ***44***, 4, 495–507.

108) Dibner, V. D. 1955 O proiskhozhdenii plovuchikh ledyanykh ostrovov (浮遊する氷の島の成因について). Priroda (自然), ***44***, 3, 89–92.

109) Shcherbakov, D. I. 1954 Ob issledovaniyakh Sovetskikh uchenykh v Arktike (北極におけるソヴェト科学者の研究). Vestn. Akad. Nauk (科学アカデミー通報), ***24***, 6, 76–77.

110) Anonymous 1954 O novykh Sovetskikh issledovaniyakh i otkrytiyakh v tsentral'noy arktike (北極中心における新らしいソヴェトの研究と発見). Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr., 5, 3–16 (筆者不明であるが本文末尾に北極研究所 (Arkticheskiy nauchno-issledovatel'skiy institut) とある).

111) Shumskiy, P. A. 1955 K izucheniyu l'dov Severnogo Ledovitogo okeana (北氷洋の氷の研究). Vestnik Akad. Nauk, ***25***, 2, 33–38.

112) Klenova, M. V. Nekotoryye rezul'taty i zadachi izucheniya geologii Arkticheskogo basseyna (北極海盆の地質研究の結果と課題). Ditto, ***25***, 3, 61–69.

113) Gusev, A. M. 1955 Arkticheskiye issledovaniya Morskogo gidrofizicheskogo instituta (海洋物理学研究所の北極研究), Ditto ***25***, 2, 39–43.

Date Due

54643 Pam:551.326.7
KUS

KUSUNOKI, Kou.
AUTHOR

Recent advances in the study
TITLE
of sea ice.

DATE LOANED	BORROWER'S NAME	DATE DUE

54643

BOREAL INSTITUTE FOR NORTHERN STUDIES, LIBRARY
THE UNIVERSITY OF ALBERTA
EDMONTON, ALBERTA T6G 2E9
CANADA

University of Alberta Library
0 1620 0332 6681